

Г. В. Домогацкий, В. Б. Бруданин, И. А. Белолептиков

Baikal-GVD: результаты экспедиции 2019 г.

Байкальский глубоководный нейтринный телескоп Baikal-GVD предназначен для исследования природного потока нейтрино высоких энергий. В результате взаимодействий нейтрино в воде оз. Байкал образуются мюоны и каскадные ливни, генерирующие черенковское излучение, которое регистрируется оптическими модулями установки. Регистрирующая система телескопа позволяет измерять времена регистрации излучения оптическими модулями, на основании которых восстанавливаются траектории движущихся частиц с угловой точностью до долей градусов. Так как траектории заряженных частиц и первоначальных частиц (нейтрино и мюонов) практически совпадают, а нейтрино в космическом пространстве движется по прямолинейным траекториям от источника практически без потери энергии, то большие глубоководные нейтринные телескопы после достижения определенных размеров позволят открыть эру нейтринной астрономии, т. е. изучать структуру и процессы Вселенной на расстояниях, не доступных ни для каких других способов и инструментов.

Впервые астрофизические нейтрино высоких энергий были зарегистрированы нейтринным телескопом IceCube (США, Германия, Швеция), что подтвердило правильность и перспективность создания сети телескопов подобного размера. Результаты обработки данных, полученных с помощью ранее установленных кластеров Baikal-GVD, показали его способность регистрировать нейтрино высоких энергий и необходимость увеличения его объема для повышения надежности и достоверности результатов.

Свойства байкальской воды, а также совокупность других сопутствующих обстоятельств дают возможность создания уникальной в мировой практике по чувствительности и угловому разрешению установки, открывающей новые горизонты в астрономии и астрофизике.

Байкальский глубоководный нейтринный телескоп является уникальной научной установкой России и, наряду с IceCube, ANTARES и KM3NeT, входит в глобальную нейтринную сеть (GNN) как важнейший

G. V. Domogatsky, V. B. Brudanin, I. A. Belolaptikov

The Baikal-GVD: Results of the Expedition-2019

The Baikal-GVD telescope is aimed at the study of the natural flux of high-energy neutrinos. As a result of interactions of neutrinos in the waters of Lake Baikal, charged leptons and cascade showers are produced that generate Cherenkov radiation, which is registered by the optical modules of the facility. The electronic system of the telescope measures the exact time of radiation registered by the optical modules with accuracy up to billionths of a second, thus making it possible to reconstruct tracks of moving particles with an angular accuracy of fractions of a degree. For characteristic energies of particles studied at the neutrino telescope, tracks of charged particles nearly coincide with the arrival direction of astrophysical neutrinos, traveling towards us without any deviations from their source and nearly without energy loss. That is why deep underwater neutrino telescopes, after reaching a particular size, open the era of neutrino astronomy, thus

allowing the study of the structure and processes of the Universe at a distance that cannot be achieved by any other means.

Astrophysical high-energy neutrinos were registered for the first time by the neutrino telescope IceCube at the South Pole (USA, Germany, and Sweden). It proved the potential of the creation of a set of similarly-sized telescopes in accordance with the proposal made by M.A. Markov in 1960. The results of data processing obtained using the Baikal-GVD clusters installed earlier showed its ability to register high-energy neutrinos and the need to extend its volume in order to increase its reliability and the accuracy of the results.

Properties of the Baikal waters, as well as the composition of other circumstances, give an opportunity to create a unique facility in terms of its sensitivity and angular

элемент сети в Северном полушарии Земли и как «первый шаг» на пути создания международного научно-консорциума «Глобальная нейтринная обсерватория» (GNO).

Телескопы, расположенные в Северном полушарии, обладают важным преимуществом: они способны вести практически непрерывное наблюдение центра Галактики (Baikal-GVD — 18 часов и KM3NeT — 15 часов в течение суток) и галактической плоскости, где сконцентрирована основная часть потенциальных галактических источников космических лучей (пульсары, остатки сверхновых, двойные системы и т.д.), включая массивную черную дыру Sgr A* в центре Галактики. Совместная работа в сети обеспечивает непрерывное наблюдение по всей небесной сфере без потери эффективности.

В результате совместной деятельности в области исследований, разработок, производства в течение 2018–2019 гг., а также монтажных работ во время экспедиции на озеро Байкал с 15 февраля по 12 апреля 2019 г. были введены в строй еще два кластера создаваемого глубоководного нейтринного телескопа кубокилометрового масштаба Baikal-GVD.

Всего в режиме набора данных в настоящее время работает 5 кластеров, состоящих из 8 вертикальных

гирлянд оптических модулей каждый, по 36 оптических модулей на гирлянде. Общее количество оптических модулей — 1440, они размещены на глубине 750–1350 м в четырех километрах от берега озера Байкал в районе 106-го километра Кругобайкальской железной дороги. Эффективный объем установки достиг уровня $\sim 0,25 \text{ км}^3$ для ливневых событий от нейтрино высоких энергий, что позволяет ожидать два-три события в год от астрофизических нейтрино с энергиями, превышающими 100 ТэВ.

В состав телескопа также входит ряд перспективных устройств, с помощью которых исследуются способы гидроакустической регистрации нейтрино сверхвысоких энергий, новые способы определения координат оптических модулей, устройства для исследований и мониторинга гидрологических и оптических свойств водной среды, устройство для измерения вариативности напряженности электрического поля в водяной толще озера Байкал.

Во время экспедиции 2019 г. был выполнен удвоенный объем работ по сравнению с прошлым годом. Для их обеспечения в 2018–2019 гг. организациями было произведено 600 оптических и 80 управляющих электронных модулей в глубоководном исполнении. Особое внимание было уделено обеспечению

resolution, thus opening new horizons in astronomy and astrophysics.

The Baikal deep underwater neutrino telescope is a unique scientific facility of Russia, and, along with IceCube, ANTARES and KM3NeT, is included in the Global Neutrino Net (GNN) as the most significant element of the net in the Northern Hemisphere and as the first step in the creation of the international scientific consortium “Global Neutrino Observatory” (GNO).

Telescopes located in the Northern Hemisphere have an important advantage: they can carry out almost permanent monitoring of the Galactic Center (Baikal-GVD operates 18 h a day; KM3NeT operates 15 h a day) and the galactic plane, where a major part of potential galactic sources of cosmic rays is concentrated (pulsars, rests of supernova, dual systems, etc.), including the supermassive black hole Sgr A* in the Galactic Center. Joint work in the net provides permanent observation of the entire celestial sphere without loss in effectiveness, and this is the aim and the advantage of joint activities.

Members of the “Baikal” collaboration report that two clusters of the deep underwater neutrino telescope of cubic-kilometer scale, Baikal-GVD, were brought into opera-

tion during the expedition to Lake Baikal from 15 February to 12 April 2019 as a result of joint research, developments, and production in 2018–2019 and assembly.

In total, five clusters now operate in data acquisition mode. Each cluster consists of 8 vertical strings of optical modules with each string containing 36 modules. There are 1440 optical modules in total, placed at a depth of 750–1350 m located 4 km away from the bank of Lake Baikal, near the 106th km of the Circum-Baikal Railway. The effective volume of the facility reached a level of 0.25 км^3 for shower events from high-energy neutrinos, thus allowing scientists to expect two to three events per year from astrophysical neutrinos with energies exceeding 100 TeV.

The telescope also consists of a set of advanced devices which use new methods of defining the space axes of the optical modules. These devices are used for the research and monitoring of hydrologic and optical properties of the water environment, and include equipment for measuring the variability of the electrical field intensity in the waters of Lake Baikal.

During the expedition of 2019, double amount of work was carried out when compared to the previous year. Organizations produced 600 optical and 80 control elec-



Глубоководные работы
по монтажу гирлянды

Deep underwater
assembly of a string



Очередной оптический
модуль подготовлен
к погружению

One more optical module
is prepared for immersion



Последнее фото перед уходом со льда.
Экспедиция 2019 г. завершена!

The last photo before leaving the ice.
Expedition-2019 is completed!

надежности глубоководной аппаратуры. Произведены все элементы несущих глубоководных конструкций, кабельные подводные магистральные и сетевые соединения, модемы гидроакустической системы позиционирования и другие элементы телескопа. Усовершенствованы технологии подготовительных, глубоководных и монтажных работ с поверхности льда, расширен парк специального автотранспорта и тракторов, существенно улучшены условия труда и быта приезжающих специалистов.

Всего в экспедиции участвовало 60 научных сотрудников, инженеров, техников, рабочих, включая волонтеров. Среди них 5 специалистов из зарубежных организаций.

В результате программа экспедиции 2019 г. выполнена полностью. В дополнение к установке двух новых кластеров гирлянд глубоководных оптических модулей проведены ремонтные и профилактические работы на трех кластерах, установленных в 2015–2018 гг., проложены две новые глубоководные линии кабельной связи. Все системы телескопа были многократно протестированы и поставлены в штатный режим набора данных.

tronic modules in deep water. Special attention was paid to the reliability of the underwater equipment. All components of the supporting underwater structures, underwater cable trunk and network connections, modems for the hydroacoustic system of positioning, and other elements of the telescope were produced. Technologies for preparation and assembly activities were developed; the parking area for special purpose cars and trucks was extended; work and life conditions of incoming specialists were significantly improved.

In total, 60 researchers, engineers, technicians, craftsmen, including volunteers, took part in the expedition. Five specialists came from foreign organizations.

The programme of expedition-2019 was fully implemented. In addition to two new clusters of strings of deep underwater optical modules, repair and routine maintenance work was done on three clusters installed in 2015–2018, and two new bottom-lying underwater lines of cable communication were built connecting the facility with the coastal center. All of the telescope's systems have been repeatedly tested and put into regular data acquisition mode.